УДК 669.85/.86, 574.21, 504.5 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-56-67

Биотехническая система оценки токсичности соединений редкоземельных металлов

М. И. Семенова, А. В. Смирнов, А. Соколов, А. С. Ковалевская, О. В. Смолова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Введение. Расширение сферы применения уникальных по своим свойствам соединений редкоземельных металлов повышает интерес многих исследователей к изучению вопроса о влиянии редкоземельных металлов и их соединений на здоровье человека и окружающую среду. Одним из актуальных и современных методов оценки безопасности исследуемых сред для биологического тест-объекта является биотестирование.
Постановка задачи. Объективная необходимость определения совокупного действия редкоземельных металлов и их соединений на здоровье человека и окружающую среду предполагает использование биологических систем. Современные методы биотестирования отличаются исключительно высокой чувствительностью, достаточной для определения подпороговых концентраций опасных веществ в соответствии с международными стандартами. Таким образом, применение данных методов может позволить с высокой точностью определить индекс и степень токсичности соединений редкоземельных металлов для подготовки пакета необходимой документации о промышленной безопасности продукции.
Теоретическая часть. На основании изученного токсикологического действия редкоземельных металлов авторами было предложено провести оценку токсичности на основе концепции биотехнических систем. Объектом исследования явились оксиды и карбонаты редкоземельных металлов. Результаты исследования по определению индекса и степени токсичности соединений редкоземельных металлов, а также по оценке летальной концентрации ЛК50 (24 ч) методом биотестирования с использованием тест-организмов Paramecium Caudatum были использованы для написания паспорта безопасности оксида и карбоната церия.
Выводы. Проведенные исследования показали, что определенная модификация технических решений, заложенных в приборах серии «Биотестер», позволяет корректно решать задачу по оценке токсичности редкоземельных металлов и их соединений. На основании результатов исследований были разработаны паспорта безопасности.

Ключевые слова: биотестовый анализ, инфузории, paramecium caudatum, редкоземельные металлы, оксиды и карбонаты, токсичность, индекс токсичности.

Для цитирования: Биотехническая система оценки токсичности соединений редкоземельных металлов / М. И. Семенова, А. В. Смирнов, А. Соколов [и др.] // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020. — № 4. — С. 56−67. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-56-67

Biotechnical toxicity assessment system of rare earth metals compounds

M. I. Semenova, A. V. Smirnov, A. Sokolov, A. S. Kovalevskaya, O. V. Smolova
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (Saint Petersburg, Russian Federation)

Introduction. Expanding the scope of application of rare-earth metal compounds that are unique in their properties increases the interest of many researchers in studying the impact of rare-earth metals and their compounds on human health and the environment. One of the most relevant and modern methods for assessing the safety of the studied media for a biological test object is bioassay.
Problem Statement. The objective necessity of determining the combined effect of rare earth metals and their compounds on human health and the environment involves the use of biological systems. Modern methods of bioassay are extremely sensitive, which is sufficient to determine sub-threshold concentrations of hazardous substances in accordance with international standards. Thus, the use of these methods can make it possible to determine the index and the degree of toxicity of rare earth metal compounds with high accuracy in order to prepare a package of necessary documentation on industrial safety of products.
Theoretical Part. Based on the studied toxicological effects of rare earth metals, the authors proposed to conduct a toxicity assessment based on the concept of biotechnical systems. The object of research was oxides and carbonates of rare earth metals. The results of the study to determine the index and the degree of toxicity of rare earth metal compounds, as well as to assess the lethal concentration of LC50 (24 h) by biotesting using test organisms Paramecium Caudatum were used to write a safety data sheet for cerium oxide and carbonate.

Conclusion. The studies have shown that a certain modification of the technical solutions embedded in the devices of the Biotester series makes it possible to correctly solve the problem of assessing the toxicity of rare earth metals and their compounds. Based on the research results, the safety data sheets were developed.

Keywords: biotest analysis, infusorias, paramecium caudatum, rare-earth metals, oxides and carbonates, toxicity, toxicity index.

For citation: Semenova M. I., Smirnov A. V., Sokolov A., Kovalevskaya A. S., Smolova O. V. Biotechnical toxicity assessment system of rare earth metals compounds: Safety of Technogenic and Natural Systems. 2020;4:56−67. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-56-67

Введение. В современном мире ежегодно возрастает область применения редкоземельных металлов. Благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам эти материалы уже нашли свое применение в таких отраслях как: металлургия, нефтедобыча, текстиль и сельское хозяйство. Однако, по мере развития технологий спектр применения редкоземельных материалов постоянно растет.

Открытие уникальных каталитических, электрических, магнитных и оптических свойств послужило почвой для внедрения металлов в более технологически сложные процессы производства мобильных устройств, гибридных автомобилей и ветряных турбин. Кроме того, применение редкоземельных металлов в технологиях чистой энергии и системах безопасности привлекло глобальное внимание к этим элементам.

Согласно многим исследованиям о влиянии редкоземельных металлов и их соединений на здоровье человека и окружающую среду, можно сделать вывод о том, что они не являются безопасными.

Одним из актуальных и современных методов оценки безопасности исследуемых сред для биологического тест-объекта является биотестирование. Оценка токсичности проводится на основе концепции биотехнических систем (БТС). Они представляют собой совокупность биологических и технических элементов, объединенных в единую функциональную систему целенаправленного поведения.

Таким образом, проведение исследований по определению индекса и степени токсичности соединений редкоземельных металлов методом биотестирования для подготовки пакета необходимой документации о промышленной безопасности продукции является весьма актуальным.

Постановка задачи. Предметом контроля и мониторинга в области охраны окружающей среды, промышленности и фармакологии зачастую являются объекты не просто переменного, но принципиально неопределенного состава, характеризующиеся большим числом многокомпонентных ингредиентов, способных к тому же изменять свои частные свойства под влиянием внешних факторов. Объективная необходимость определения совокупного действия всего комплекса факторов требует применения новых оперативных средств контроля с использованием биологических систем, которые могут моделировать действие неблагоприятных факторов на живые организмы и, в конечном счете, на человека. Таким образом, целью исследовательской деятельности явилось определение индекса и степени токсичности соединений редкоземельных металлов методом биотестирования для подготовки пакета необходимой документации о промышленной безопасности продукции.

Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

— анализ возможности применения биотестирования на простейших для оценки токсичности веществ;

— определение индекса токсичности исследуемых соединений;

— установление значения средней летальной концентрации лк50 (24 ч) с помощью тест-организмов paramecium caudatum для определения степени токсичности исследуемых веществ;

— разработка паспортов безопасности для оксида и карбоната церия.

Теоретическая часть

Свойства редкоземельных металлов. Редкоземельные металлы (РЗМ) состоят из семнадцати элементов, 15 из которых называются лантаноидами. Два дополнительных элемента — скандий (Sc) и иттрий (Y) — включены в список РЗМ из-за их сходных химических и токсикологических свойств и по причине того, что они часто встречаются в тех же рудных месторождениях, что и другие РЗМ.

Все металлы данной группы обладают очень похожими физико-химическими свойствами. Приведем некоторые из этих свойств:

— серебристо-белые мягкие металлы, которые тускнеют при соприкосновении с воздухом;

— растворимость увеличивается с увеличением атомного номера;

— высокая температура плавления и кипения;

— являются сильными парамагнитиками;

— имеют высокую электропроводимость;
— активные восстановители;
— способны взрываться на воздухе;
— способны к флуоресценции под ультрафиолетовым светом;
— пыль этих соединений может быть пожаро- и взрывоопасной [1, 2].

Применение РЗМ и их соединений. Редкоземельные металлы играют все более важную роль в современном производстве. Основное их применение нашло отображение в процессах производства «высоких технологий». Примерами таких технологий могут быть мобильные телефоны, оптические линзы, цифровые камеры, высокопроизводительные магниты, батареи, автомобильные каталитические нейтрализаторы, металлические сплавы, лазеры, медицинские изображения, устройства с «зеленой» энергией и системы аэрокосмического оружия [1].

Одними из наиболее применяемых форм редкоземельных металлов являются карбонаты и оксиды. Оксиды, в основном, применяются для создания лазерных установок, керамических изделий и стекла за счет своих уникальных оптических свойств. К примеру, оксид лантана используется для изготовления специальных оптических очков, инфракрасного адсорбирующего стекла, а также люминофоров. Оксиды иттрия применяются в производстве керамики и стекла. Они имеют высокие температуры плавления и придают стеклу ударопрочность и низкое расширение [2, 3].

Карбонаты используются, в основном, для покрытия поверхностей или при производстве термоэлектрических материалов. К примеру, карбонатом церия покрываются выхлопные трубы автомобилей, так как это соединение поглощает выхлопные газы [4].

Токсикологическое действие РЗМ и их соединений. На основе атомной массы РЗМ разделены на две группы: «легкие» (Ce, Eu, Gd, La, Nd, Pr и Sm) и «тяжелые» (Dy, Er, Ho, Lu, Tb, Tm, Y и Yb). Роль РЗМ в живых системах до конца не изучена. Легкие РЗМ откладываются, в основном, в печени, в то время как тяжелые РЗМ имеют тенденцию замещать кальций и откладываться в костях. Токсичность РЗМ обычно уменьшается с увеличением атомной массы [1–3].

РЗМ способны поражать легкие, кровь, разрушать тромбоциты, изменять структуру ДНК, приводить к нарушениям работы почек и головного мозга. К примеру, гадолиний способен накапливаться в мягких тканях головного мозга в подпаутинном пространстве головного мозга. Кроме этого, были проведены опыты, которые показали воздействие РЗМ на развитие плода у беременных мышей. Однако ни один из РЗМ в настоящее время не классифицирован как канцероген [1, 5].

Материалы и методы оценки токсичности соединений РЗМ. Обширное применение РЗМ в процессах различных производств, а также их способность оказывать негативное влияние на окружающую среду и организм человека приводят к необходимости оценки степени вредного воздействия металла и составления необходимой документации о безопасности продукта.

Комплекс методических и аппаратных средств, направленных на оценку токсичности веществ по биологической активности тест-объектов является измерительной биотестовой системой.

Биотестирование — это процедура выявления токсичности среды при помощи тест-объектов, которые сигнализируют об опасности, независимо от того, какими веществами и в каких сочетаниях были вызваны изменения жизненно важных функций тест-объектов [6].

В основе построения системы биотестирования лежат общие принципы создания биотехнических систем (рис. 1).

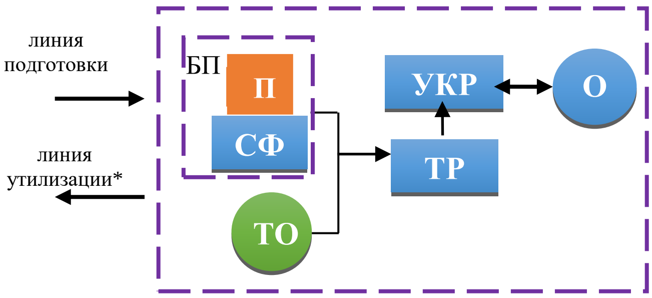


Рис. 1. Биотестовая биотехническая система:
П — проба; ТО — биообъект, использующийся в качестве тест-объекта;
БП — блок пробоподготовки; СФП — средства формирования пробы;
УКР — устройства контроля реакции; О–И — оператор-исследователь;
* специальная утилизация ввиду непатогенности культуры не требуется

Главной функцией канала биотестирования является получение на выходе численного показателя с определенной точностью. С точки зрения биотехнических систем, биотестирование представляет собой измерительную задачу, имеющую некоторые измеряемые параметры и собственное метрологическое обеспечение. Принцип работы биотестовой системы можно представить в виде математической модели, в которой через функцию распределения концентрации токсичного вещества в пространстве и во времени будет реализована функция распределения токсичности. При этом важной частью в разработке систем биотестирования является создание измерительного преобразователя. Чаще всего используются оптические преобразователи измерений, так как они обладают минимальной погрешностью. Также с помощью оптико-акустического метода можно прямо измерить оптические характеристики рассеивающих сред. Кроме прочего, в состав системы биотестирования необходимо включить и среду лаборатории, где проводится тестирование, так как она является окружающей средой и должна соответствовать определённым условиям по температуре и влажности, а также не должна содержать токсичных веществ.

Ещё одной частью системы биотестирования являются тест-объекты (ТО).

При проведении биотестового анализа тест-объектом могут служить различные организмы: инфузории, дафнии, водоросли, рыбы и др. Выбор тест-объекта зависит от тест-реакции, которую планируется фиксировать, и среды, биотестирование которой проводят.

Одним из наиболее распространённых и удобных для биотестирования тест-объектов является инфузория Paramecium Caudatum. Инфузория обладает рядом свойств, за счет которых ее применение является наиболее целесообразным:

— биологическая значимость: инфузория P. Caudatum является одним из наиболее распространенных видов лабораторных организмов;

— безвредность для человека и животных;

— хорошая изученность;

— высокая чувствительность к токсичным веществам;

— доступность культивирования для любой практической лаборатории;

— низкая стоимость культуры;

— ярко выраженные таксисы [6].

Данный организм относится к подцарству простейших — Protozoa, типу Ciliphora. В естественной среде инфузория туфелька распространена в пресных водоемах, таких как озера, болота, пруды и т.д. Форма клетки эллипсоидная, размеры — 200 × 40 мкм. Основную пищу инфузории составляют бактерии, дрожжи и т.п. Размножение инфузории происходит путем поперечного деления клетки. Поверхность тела инфузорий покрыта ресничками, которые служат одновременно для перемещения в водной среде и выполняют функции рецепторов, воспринимающих химические стимулы.

Отличительной чертой инфузории является ее непрерывное движение. Причем характер этого движения может изменяться в зависимости от окружающих факторов. Особенностью инфузорий можно считать наличие отрицательного геотаксиса — свойство инфузорий всплывать в верхние слои жидкости, которое характеризуется, как движение против гравитационного поля Земли. Но, что наиболее важно, так это реакция простейших на токсические вещества. Постоянное стремление инфузорий найти свою зону комфорта приводит к ответным двигательным реакциям на химические раздражители. В случае, если токсические вещества являются вредными для простейших, инфузории будут стараться уплыть от них. Данное явление получило название хемотаксис.

Стоит отметить, что хемотаксическая реакция инфузорий сильнее геотаксической [7]. Хемотаксическая реакция реализуется при условии наличия стабильного во времени градиента концентраций химических веществ.

При биотестировании на инфузориях о токсичности исследуемой пробы судят по выживаемости, интенсивности размножения, изменению двигательной активности, поведенческим (таксическим) реакциям и др. [8].

В данном исследовании оценка проводилась по показателям индекса и степени токсичности соединений редкоземельных металлов на основе хемотаксической реакции.

Также была определена летальная концентрация ЛК50. Длительность опыта в данном случае составляла 24 часа.

В качестве оценки безопасности продукта (пробы) были проведены исследования следующих редкоземельных металлов: неодим, иттрий, церий, лантан, празеодим и гадолиний.

Для получения объективной количественной информации о тест-реакции было применено устройство контроля реакции (УКР), представляющее собой прибор Боитестер-2М.

Применение прибора серии «Биотестер» для оценки токсичности редкоземельных металлов. Исследование проводилось в соответствии с ПНД Ф Т 16.3.1–10 «Методика определения токсичности отходов производства и потребления экспресс-методом с применением прибора серии «БИОТЕСТЕР», т.к. исследуемые соединения — это неорганические порошкообразные химические вещества [9].

Учитывая тот факт, что хемотаксическая реакция реализуется при условии наличия стабильного во времени градиента концентраций химических веществ, то в данной методике подобный градиент создается наложением друг на друга двух сред: взвеси, содержащей инфузории, и исследуемой пробы. Две среды располагаются вертикально относительно друг друга: верхней будет являться проба, а нижней — взвесь инфузорий. Чтобы среды не перемешивались друг с другом, необходимо добиться разности плотностей двух сред, при этом оставив возможность свободного перемещения инфузорий между ними.

Критерием токсического действия является значимое различие в числе клеток инфузорий между двумя зонами. В случае, если исследуемая проба не содержит токсических веществ, в кювете будет наблюдаться концентрирование клеток инфузорий в верхней зоне. А чем выше будет токсичность пробы, тем меньше в ней распределится инфузорий.

Биотестер-2М представляет собой прибор, определяющий концентрацию частиц в однородной среде по величине прошедшего излучения. Основной принцип действия прибора заключается в считывании изменения потока прошедшего излучения. Для реализации этого явления необходимо наличие источника света или излучателя и фотоприемника.

Кювета, содержащая градиентную среду, т.е. наложение исследуемой токсичной пробы на раствор с инфузориями помещается между источником света (ИИ) и приемником (ФП). От излучателя испускается световой поток определенной площади S. Каждый объект при пересечении потока взаимодействует с излучением, как прозрачная сфера, подчиняющаяся законам геометрической оптики (рис. 2) [10].

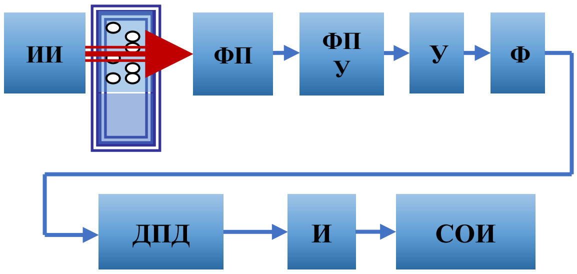


Рис. 2. Структурная схема прибора Биотестер-2М

Иными словами, каждая инфузория, которая попадает под луч света, будет изменять его интенсивность. Изменение интенсивности будет фиксировать фотоприемник, на который приходит луч света. При этом количественное изменение интенсивности света пропорционально количеству инфузорий.

Каждая из исследуемых проб анализировалась в 3-х кюветах, с каждой кюветы снималось по 5 показаний прибора «БИОТЕСТЕР-2М».

Согласно ПНД Ф Т 16.3.16-10 для предотвращения грубых ошибок во время анализа оперативно производилась оценка приемлемости контрольной пробы по следующему неравенству:

$$|Ikmax - Ikmin| \leq 0{,}2Icp.k, \quad (1)$$

где $Ikmax$ — максимальные показания прибора для контрольных проб, $Ikmin$ — минимальные показания прибора для контрольных проб, $Icp.k$ — средние показания прибора для контрольных проб [9].

Оценка токсичности пробы производилась по относительной разнице количества инфузорий в верхней зоне кюветы в контрольной и анализируемой пробе. В соответствии с ПНД Ф Т 16.3.16-10 индекс токсичности рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{|I\text{ср.к} - I\text{ср.пр}|}{I\text{ср.к}} \times K, \quad (2)$$

где $I_{\text{ср.k}}$ — средние показания прибора для контрольных проб, $I_{\text{ср.пр}}$ — средние показания прибора для анализируемых проб, К — коэффициент разбавления пробы. Индекс токсичности Т — это величина безразмерная и может принимать значения от 0 до 1 в соответствии со степенью токсичности анализируемой пробы.

Согласно ПНД Ф Т 16.3.16-10, в зависимости от значения индекса, пробы классифицируют по степени их токсичности на 3 группы:

— I. Допустимая степень токсичности (0,00 < Т ≤ 0,40).

— II. Умеренная степень токсичности (0,40 < Т ≤ 0,70).

— III. Высокая степень токсичности (Т > 0,70).

Установление значения средней летальной концентрации ЛК$_{50}$ (24 ч) с помощью тест-организмов Paramecium caudatum. Сущность метода заключается в регистрации выживаемости пресноводных тест-организмов Paramecium caudatum в анализируемой пробе исследуемого объекта относительно контрольной пробы, определении ее токсичности и токсикологических показателей при тестировании 6, 24 или 96 ч [11].

Определение токсичности и средней летальной концентрации ЛК$_{50}$ (24 ч) проводилось в соответствии с ГОСТ Р 57166–2016 «Вода. Определение токсичности по выживаемости пресноводных инфузорий Paramecium caudatum».

Для приготовления аналитического раствора необходимо использовать 50 граммов сухого соединения редкоземельного металла и 450 мл дистиллированной воды. Далее в течение 6–7 часов происходит перемешивание с помощью магнитной мешалки на минимальной скорости. После окончания перемешивания смесь отстаивается в течение 14 часов. Надосадочная жидкость пропускается через фильтровальную бумагу. Спустя 24 часа визуально осматриваются емкости с анализируемым раствором и подсчитывается количество выживших инфузорий [11].

Результаты исследований. Индексы токсичности (без учета коэффициента разбавления), полученные при десятикратном разбавлении карбонатов исследуемых веществ, представлены на рис. 3 (красной линией на диаграмме обозначен уровень нетоксичности пробы).

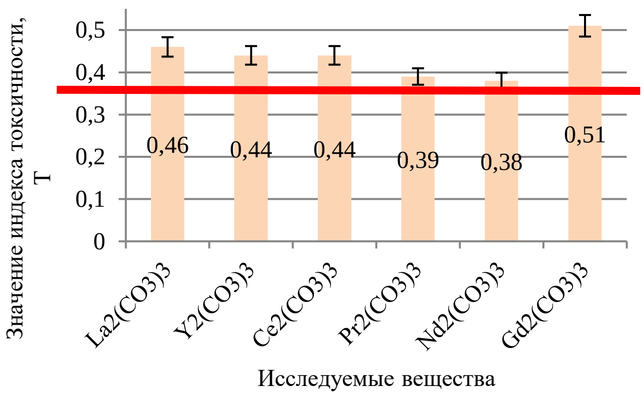


Рис. 3. Значение индексов токсичности карбонатов исследуемых металлов при 10-кратном разбавлении пробы

Как видно из диаграммы, при десятикратном разбавлении карбонат празеодима и неодима считаются нетоксичными в соответствии с ПНД Ф Т 16.3.16–10 (Т ≤ 0,40). А остальные пробы карбонатов исследуемых редкоземельных металлов необходимо разбавить в 100 раз. Значения индексов токсичности стократного разбавления (без учета коэффициента разбавления) представлены на рис. 4.

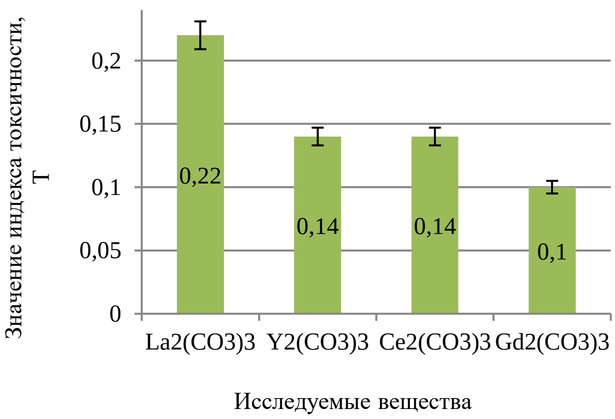


Рис. 4. Значение индексов токсичности карбонатов исследуемых металлов при 100-кратном разбавлении пробы

Из полученной диаграммы видно, что при 100-кратном разбавлении карбонаты исследуемых редкоземельных металлов являются нетоксичными в соответствии с ПНД Ф Т 16.3.16–10 (Т ≤ 0,40).

Конечные значения индексов токсичности карбонатов исследуемых редкоземельных металлов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Индексы токсичности исследуемых карбонатов редкоземельных металлов

Определяемый показатель	Результаты анализа		Индекс токсичности (без учета кратности разбавления)	Степень токсичности пробы, Т
	Исследуемое вещество	Кратность разбавления		
Токсичность пробы на инфузории Paramecium caudatum	$La_2(CO_3)_3$	100	0,22	Высокая, Т = 22
	$Y_2(CO_3)_3$	100	0,14	Высокая, Т = 14
	$Ce_2(CO_3)_3$	100	0,14	Высокая, Т = 14
	$Pr_2(CO_3)_3$	10	0,39	Высокая, Т = 3,9
	$Nd_2(CO_3)_3$	10	0,38	Высокая, Т = 3,8
	$Gd_2(CO_3)_3$	100	0,1	Высокая, Т = 10

Кроме карбонатов, индексы токсичности рассчитывались и для оксидов исследуемых соединений. Индексы токсичности (без учета коэффициента 0,22; 0,14; 0,14; 0,1; 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; $La_2(CO_3)_3$ $Y_2(CO_3)_3$ $Ce_2(CO_3)_3$ $Gd_2(CO_3)_3$ Значение индекса токсичности, полученные при десятикратном разбавлении оксидов исследуемых металлов, представлены на рис. 5 (красной линией на диаграмме обозначен уровень нетоксичности пробы).

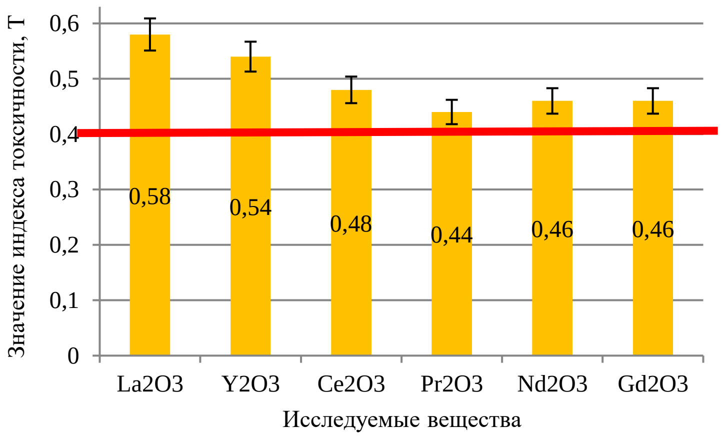


Рис. 5. Значение индексов токсичности оксидов исследуемых металлов при 10-кратном разбавлении пробы

Как видно из диаграммы, при десятикратном разбавлении все рассматриваемые оксиды являются токсичными соединениями в соответствии с ПНД Ф Т 16.3.16-10 (Т ≤ 0,40), следовательно, необходимо разбавить пробы исследуемых веществ в 100 раз. Значения индексов токсичности стократного разбавления (без учета коэффициента разбавления) представлены на рис. 6.

Из полученной диаграммы видно, что при 100-кратном разбавлении оксиды исследуемых редкоземельных металлов являются нетоксичными в соответствии с ПНД Ф Т 16.3.16-10 (Т ≤ 0,40).

Конечные значения индексов токсичности оксидов рассматриваемых редкоземельных металлов представлены в таблице 2.

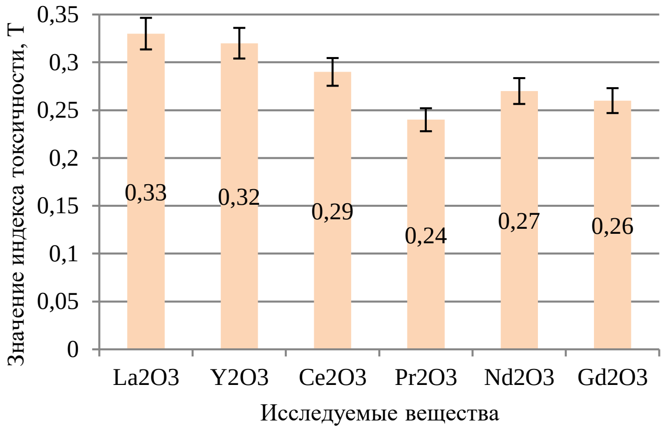


Рис. 6. Значение индексов токсичности оксидов исследуемых металлов при 100-кратном разбавлении пробы

Таблица 2

Индексы токсичности исследуемых оксидов редкоземельных металлов

Определяемый показатель	Результаты анализа		Индекс токсичности (без учета кратности разбавления	Степень токсичности пробы, Т
	Исследуемое вещество	Кратность разбавления		
Токсичность пробы на инфузории Paramecium caudatum	La_2O_3	100	0,33	Высокая, Т = 33
	Y_2O_3	100	0,32	Высокая, Т = 32
	Ce_2O_3	100	0,29	Высокая, Т = 29
	Pr_2O_3	100	0,24	Высокая, Т = 24
	Nd_2O_3	100	0,27	Высокая, Т = 27
	Gd_2O_3	100	0,26	Высокая, Т = 26

Результаты измерений индекса токсичности карбонатов и оксидов редкоземельных металлов подвергались оценке приемлемости в соответствии с рекомендациями, представленными в ПНД Ф Т 16.3.16–10. Сходимость результатов параллельных определений проверялась по формуле:

$$|T - Tmax, \min| \le r, \quad (3)$$

где r — норматив оперативного контроля сходимости (r = 0,43Т); T — среднее арифметическое значение результатов 3-х параллельных измерений индекса токсичности в условных единицах; T_{max} — максимальное значение индекса токсичности пробы трех параллельных определений; T_{min} — минимальное значение индекса токсичности пробы трех параллельных определений.

Согласно проведенной оценке, условие (3) выполняется для каждого из результатов, значит, полученные результаты можно считать достоверными.

Определение токсичности и средней летальной концентрации ЛК50 (24 ч) проводилось в соответствии с ГОСТ Р 57166–2016 «Вода. Определение токсичности по выживаемости пресноводных инфузорий Paramecium caudatum».

Результаты анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты биотестирования на острую токсичность

Вещество	Продолжительность тестирования, ч	Массовая концентрация вещества, мг/дм3	Кол-во выживших организмов в емкостях, шт			Среднее арифметическое значение кол-ва выживших организмов, шт.	Процент гибели тест-организмов, %
			1	*2*	*3*		
La_2O_3	24	0(контроль)	30	30	30	30	0
		0,00424	17	16	16	16	46

		0,02924	16	17	14	16	48
		0,05424	15	13	17	15	50
		0,07924	12	13	12	12	59
		0,10424	11	12	13	12	60
Y_2O_3	24	0(контроль)	30	30	30	30	0
		0,0064	16	18	18	17	42
		0,0314	15	16	18	16	46
		0,0564	14	14	17	15	50
		0,0814	12	11	14	12	59
		0,1064	12	11	13	12	60
Ce_2O_3	24	0(контроль)	30	30	30	30	0
		0,062	18	17	16	17	43
		0,087	14	17	14	15	50
		0,112	14	11	13	13	58
		0,137	13	11	12	12	60
		0,162	10	9	11	10	67
Pr2O3	24	0(контроль)	30	30	30	30	0
		0,047	26	27	26	26	12
		0,072	23	23	24	23	22
		0,097	16	12	17	15	50
		0,122	13	11	14	13	58
		0,147	11	10	12	11	63
Nd2O3	24	0(контроль)	30	30	30	30	0
		0,06	19	20	21	20	33
		0,085	18	18	17	18	41
		0,11	17	16	18	17	43
		0,135	15	13	17	15	50
		0,16	11	13	16	13	56
Gd2O3	24	0(контроль)	30	30	30	30	0
		0,4	14	16	17	16	48
		0,425	13	17	15	15	50
		0,45	11	12	10	11	63
		0,475	10	11	8	10	68
		0,5	9	8	9	9	71
La2(CO3) 3	24	0(контроль)	30	30	30	30	0
		0,009	19	19	20	19	36
		0,034	18	17	19	18	40
		0,059	16	18	15	16	46
		0,084	15	17	13	15	50
		0,109	13	15	11	13	57
Y2(CO3)3	24	0(контроль)	30	30	30	30	0
		0,0155	18	19	20	19	37
		0,0405	17	16	17	17	44
		0,0655	15	15	18	16	47
		0,0905	13	13	18	15	50
		0,1155	12	11	14	12	59
Ce2(CO3) 3	24	0(контроль)	30	30	30	30	0
		0,101	17	20	18	18	39

		0,126	17	18	15	17	44
		0,151	15	18	12	15	50
		0,176	14	13	12	13	57
		0,201	12	13	11	12	60
$Pr_2(CO_3)_3$	24	0(контроль)	30	30	30	30	0
		0,078	17	20	19	19	38
		0,103	16	18	17	17	43
		0,128	14	17	16	16	48
		0,153	14	16	15	15	50
		0,178	11	12	14	12	59
$Nd_2(CO_3)_3$	24	0(контроль)	30	30	30	30	0
		0,16	18	20	18	19	38
		0,185	16	18	16	17	44
		0,21	14	15	15	15	50
		0,235	13	14	14	14	54
		0,26	12	13	13	13	58
$Gd_2(CO_3)_3$	24	0(контроль)	30	30	30	30	0
		0,59	18	16	20	18	40
		0,615	16	15	18	16	46
		0,64	16	13	17	15	50
		0,665	14	12	15	14	54
		0,69	11	10	15	12	60

По результатам биотестирования, выполненного в соответствии с ГОСТ Р 57166–2016, видно, что пробы являются высокотоксичными и представляют опасность для окружающей среды и человека.

Выводы. По результатам исследовательской работы были определены индексы токсичности соединений ряда редкоземельных металлов. Согласно ПНД Ф Т 16.3.16–10 «Методика определения токсичности отходов производства и потребления экспресс-методом с применением прибора серии «БИОТЕСТЕР», данные вещества являются высокотоксичными соединениями. По результатам анализа средней летальной концентрации ЛК50 (24 ч) с помощью тест- организмов Paramecium caudatum было доказано, что данные соединения относятся к высокотоксичным в соответствии с ГОСТ Р 57166–2016.

На основании результатов исследований были разработаны паспорта безопасности в соответствии с ГОСТ 30 333–2007 «Паспорт безопасности химической продукции. Общие требования» и Р 50.1.102–2014 «Составление и оформление паспорта безопасности химической продукции». Полученные результаты внесены в раздел 12 «Информация о воздействии на окружающую среду».

Библиографический список

1. Hirano S., Suzuki K. Exposure, Metabolism, and Toxicity of Rare Earths and Related Compounds / Environmental Health Perspectives. 1996, Vol. 104. P. 85–95.

2. Rare Earth Properties // ThoughtCo : [сайт]. — URL : https://www.thoughtco.com/rare-earth-properties-606661 (дата обращения : 05.09.2020).

3. Lanthanum – Properties and Applications // AzoMaterials : [сайт]. — URL : https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6064 (дата обращения : 05.09.2020).

4. Карбонат церия // Трубное решение : [сайт]. — URL : https://kzn.truboproduct.ru/karbonat_tserija/ (дата обращения : 13.09. 2019).

5. Li X., Chen Z, Zhang Y. A human health risk assessment of rare earth elements in soil and vegetables from a mining area in Fujian Province, Southeast China / Chemosphere. 2013, Vol. 93. P. 1240 – 1246

6. Чеснокова, С. М. Биологические метод качества объектовы оценки окружающей среды: учеб. пособие. Ч. 2. Методы биотестирования / С. М. Чеснокова, Н. В. Чугай. — Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. — 92 с.

7. Р 50.1.102-2014 Составление и оформление паспорта безопасности химической продукции // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации : [сайт]. — URL : http://docs.cntd.ru/document/1200122856 (дата обращения : 15.09.2020).

8. Виноходов, Д. О. Научные основы биотестирования с использованием инфузорий: автореф. дис. … д-ра биол. наук / Д. О. Виноходов. — Санкт-Петербург, 2007. — 40 с.

9. ПНД Ф Т 16.3.16–10 (ред. 2015 г.) Методика определения токсичности проб почв, донных отложений и осадков сточных вод экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер» // Нормативные базы ГОСТ/СП/СНиП : [сайт]. — URL : http://files.stroyinf.ru/Data2/1/429378/ 4293758202.htm (дата обращения : 10.09.2020).

10. Завгородний, А. В. Разработка метода и средства контроля пространственно-временного распределения оптических характеристик взвеси инфузорий для биотестирования водных сред: автореф. дис. … канд. техн. наук / А. В. Завгородний. — Санкт-Петербург, 2008. — 19 с.

11. ГОСТ Р 57 166–2016. Вода. Определение токсичности по выживаемости пресноводных инфузорий Paramecium caudatum Ehrenberg // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации : [сайт]. — URL : http://docs.cntd.ru/document/1200140393 (дата обращения : 15.09.2020).

Сдана в редакцию 17.09.2020
Запланирована в номер 19.10.2020

Об авторах:

Семенова Маргарита Игоревна, ассистент кафедры «Инженерная защита окружающей среды», аспирант кафедры «Инженерная защита окружающей среды» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197376, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6644-7663, Smi-2409@yandex.ru

Смирнов Андрей Владимирович, магистрант кафедры «Инженерная защита окружающей среды» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197376, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6515-3460, anrdrewmolodec@gmail.com

Соколов Алексей, магистрант кафедры «Инженерная защита окружающей среды» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197376, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7522-3354, sokolowalexey@gmail.com

Ковалевская Алла Станиславовна, доцент кафедры «Инженерная защита окружающей среды» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197376, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9943-3508, lellikat@yandex.ru

Смолова Ольга Владимировна, ассистент кафедры «Инженерная защита окружающей среды» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197376, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0368-7381, eco_leti@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

М. И. Семенова — проведение исследований по определению индекса токсичности соединений редкоземельных металлов; А. В. Смирнов — проведение исследований по определению средней летальной концентрации ЛК50, подготовка текста; А. Соколов — проведение расчетов, анализ результатов, формирование выводов; А. С. Ковалевская — научное руководство, корректировка выводов; О. В. Смолова — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, доработка текста.

Submitted 17.09.2020
Scheduled in the issue 19.10.2020

Authors:

Semenova, Margarita I., Assistant, Department of Engineering Protection of Environment, Post-graduate student, Department of Engineering Protection of Environment, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, Professora Popova str., Saint-Petersburg, 197376, RF), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6644-7663, Smi-2409@yandex.ru

Smirnov, Andrey V., Master's degree student, Department of Engineering Protection of Environment, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, Professora Popova str., Saint-Petersburg, 197376, RF), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6515-3460, anrdrewmolodec@gmail.com

Sokolov, Aleksey, Master's degree student, Department of Engineering Protection of Environment, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, Professora Popova str., Saint-Petersburg, 197376, RF), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7522-3354, sokolowalexey@gmail.com

Kovalevskaya, Alla S., Associate professor, Department of Engineering Protection of Environment, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, Professora Popova str., Saint-Petersburg, 197376, RF), Cand. Sci., Associate professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9943-3508, lellikat@yandex.ru

Smolova, Olga V., Assistant, Department of Engineering Protection of Environment, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, Professora Popova str., Saint-Petersburg, 197376, RF), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0368-7381, eco_leti@mail.ru

Contribution of the authors:

M. I. Semenova — research to determine the toxicity index of rare earth metal compounds; A. V. Smirnov — research to determine the average lethal concentration of LC50, preparation of the text; A. Sokolov —calculations performance, analysis of the results, formulation of the conclusions; A. S. Kovalevskaya — scientific supervision, correction of the conclusions; O. V. Smolova — formulation of the main concept, goals and objectives of the study, finalizing the text.